

## 明らかな誤りの訂正請求書

特許庁長官殿

1. 國際出願の表示 PCT/JP2004/016434

2. 出願人

名 称

株式会社村田製作所

あて名

MURATA MANUFACTURING CO., LTD.

〒617-8555 日本国京都府長岡京市東神足1丁目10番1号

10-1, Higashikotari 1-chome,

Nagaokakyō-shi, Kyoto 617-8555 Japan

日本国 Japan

住 所

日本国 Japan

3. 代理人

氏 名

(6474) 弁理士 深見 久郎

FUKAMI Hisao



あて名

〒530-0054 日本国大阪府大阪市北区南森町2丁目1番29号

三井住友銀行南森町ビル 深見特許事務所

Fukami Patent Office,

Mitsui Sumitomo Bank Minamimorimachi

Bldg., 1-29, Minamimorimachi 2-chome,

Kita-ku, Osaka-shi,

Osaka 530-0054 JAPAN

4. 訂正の対象

願書第Ⅱ欄の出願人の欄および第Ⅲ欄のその他の出願人又は発明者の欄

5. 訂正の内容

米国を除く全ての指定国における出願人および米国における出願人および発明者のあて名について

「Higashi Kotari 1-chome,」を「Higashikotari 1-chome,」と訂正する。

6. 添付書類の目録

(1) 願書1/4、2/4頁の新たな用紙

各1通

## 明細書

電磁界解析装置、電磁界解析プログラムおよびそのプログラムを記録した記録媒体

### 技術分野

[0001] 本発明は、多層商品、ギガフィルタ、EMI(Electro-Magnetic Interference)除去フィルタなどの高周波商品の開発や設計に使用する電磁界シミュレーション技術に関し、特に、シミュレーション時間の短縮を可能にした電磁界解析装置、電磁界解析プログラムおよびそのプログラムを記録した記録媒体に関する。

### 背景技術

[0002] 近年、高周波商品の開発や設計が盛んに行なわれており、高周波商品の電磁界解析を行なうのに電磁界シミュレーションソフトが広く使用されるようになってきている。一般に、電磁界解析には有限要素法が利用される場合が多い。この有限要素法を用いた電磁界シミュレーションにおいては、連立1次方程式を解くのに長い時間がかかるため、高速な解法が望まれている。特に、電磁界解析の分野では、ガウスの消去法と呼ばれる直接法しか使えないため、計算時間が長くなるという問題は一層深刻である。

[0003] ところが、1999年に発表されたHiptmairの論文(R.Hiptmair, "Multigrid method for Maxwell's equations," SIAM Journal of Numerical Analysis, vol.36, no.1, pp.204-225, 1999)により、Multigridという解法が電磁界解析でも使えることが証明され、直接法に比べて劇的にスピードアップする解法として注目されている。

[0004] Multigrid法は、解析対象を細かな要素と粗い要素との2種類に分割し、粗い要素の解を利用して細かな要素の解を求めるものである。

[0005] ガウスの消去法を使用して連立1次方程式を計算する場合、一般に計算時間は行列の次元の3乗に比例する。次元の大きさは要素の数に相当するので、たとえば要素の数が2倍になれば計算時間は8倍、要素の数が10倍になれば計算時間が1000倍となる。そこで、粗い要素に対してのみガウスの直接法を適用し、細かな要素に対しては粗い要素の解を利用して近似解を求め、ガウスの消去法を使用しないように

すれば細かな要素に対する計算時間を $1/8$ 、 $1/1000$ に短縮できる。実際には、付加的な計算時間が加算されるため、これほどの短縮にはならないものの、大幅に計算時間を短縮できることには間違いない。

[0006] Multigrid法は、Nested Meshを使用する方法と、Non-Nested Meshを使用する方法とに分類される。しかしながら、後述するようにプロロングーション(Prolongation)行列が未完成のため、Nested Meshを使用せざるを得ない。

[0007] 図12A～12Bは、Nested Meshによる要素の分割を説明するための図である。図12Aは、2次元解析の場合のNested Meshによる要素の分割を示しており、粗い三角形要素を均等に分割して4つの細かな三角形要素を作成する。また、図12Bは、3次元解析の場合のNested Meshによる要素の分割を示しており、粗い四面体要素を均等に分割して8つの細かな四面体要素を作成する。図12A～12Bから分かるように、Nested Meshにおいては、粗い要素と細かな要素との間に幾何学的な制約がある。  
 非特許文献1:R.Hiptmair, "Multigrid method for Maxwell's equations," SIAM Journal of Numerical Analysis, vol.36, no.1, pp.204-225, 1999  
 非特許文献2:D.Dibben and T.Yamada, "Non-nested multigrid and automatic mesh coarsening for high frequency electromagnetic problems," 電気学会研究会資料, SA-02-34, pp.71-75, 2002

### 発明の開示

#### 発明が解決しようとする課題

[0008] 図13A～13Cは、Nested Meshの第1の問題点を説明するための図である。図13Aは、円をNested Meshによって要素分割して、粗い要素を作成したところを示している。また、図13Bは、粗い要素をNested Meshによって細かな要素に分割したところを示している。図13Aおよび図13Bから分かるように、Nested Meshの幾何学的な制約によって曲面を正確に表現することができない。

[0009] また、図13Cは、円をNon-Nested Meshによって要素分割して、細かな要素を作成したところを示している。図13Cから分かるように、幾何学的な制約がないため、曲面を正確に表現することができる。

[0010] 図14A～14Cは、Nested Meshの第2の問題点を説明するための図である。図14

Aは、正方形をNested Meshによって要素分割して、粗い要素を作成したところを示している。また、図14Bは、粗い要素をNested Meshによって細かな要素に分割したところを示している。図14Aおよび図14Bから分かるように、Nested Meshの幾何学的な制約によって部分的に細かくすることができない。

- [0011] また、図14Cは、正方形をNon-Nested Meshによって要素分割して、細かな要素を作成したところを示している。図14Cから分かるように、幾何学的な制約がないため、部分的に細かくすることができる。
- [0012] 工業製品のほとんどは円柱や球などの曲面があり、また部分的に細かなところも必ずある。したがって、Nested Meshを工業製品などに用いることは困難である。一方、Non-Nested Meshには幾何学的な制約が一切ないため、細かな要素を自由に作成することができる。しかしながら、位置関係に規則性がないため、粗い要素と細かな要素との間の電磁界の関連付けが難しい。この粗い要素と細かな要素との関連付けを行なうのがProlongation行列であるが、正確なProlongation行列は発見されていない。このことは、Multigrid法が実用的に使用できないことを意味しており、電磁界解析においてはガウスの直接法という計算時間のかかる方法を用いざるを得ない。
- [0013] 本発明は、上記問題点を解決するためになされたものであり、その目的は、Non-nested Meshを使用したMultigrid法を用いて電磁界解析を行なうことが可能な電磁界解析装置、電磁界解析プログラムおよびそのプログラムを記録した記録媒体を提供することである。
- [0014] 他の目的は、電磁界解析に要する時間を大幅に短縮することが可能な電磁界解析装置、電磁界解析プログラムおよびそのプログラムを記録した記録媒体を提供することである。

#### 課題を解決するための手段

- [0015] 本発明のある局面に従えば、電磁界解析装置は、解析対象の形状データを粗い要素と細かな要素とに分割するための分割手段と、分割手段によって分割された粗い要素の電磁界ベクトルと細かな要素の電磁界ベクトルとを関連付ける行列を作成するための作成手段と、作成手段によって作成された行列を参照しながら、連立1次方程式の反復解法を適用して細かな要素の電磁界ベクトルの近似解を演算するた

めの演算手段とを含む。

- [0016] 好ましくは、作成手段は、細かな要素の辺における電磁界ベクトルを、粗い要素における補間関数を用いて表すことによって行列を作成する。
- [0017] さらに好ましくは、細かな要素の辺<sub>i</sub>の長さを  $|l_i|$ 、細かな要素の辺<sub>i</sub>の位置 $x_i$ における電磁界と粗い要素の辺<sub>j</sub>における電磁界との関係を示す補間関数を  $N_j^c(x_i)$ 、細かな要素の辺<sub>i</sub>の接線ベクトルを  $t_i$  とすると、作成手段は後述する式(14)によって行列  $P_{ij}$  を作成する。
- [0018] さらに好ましくは、演算手段は、連立1次方程式の定常的な反復解法を適用して細かな要素の電磁界ベクトルの近似解に含まれる高周波成分を除去し、作成手段によって作成された行列を用いて細かな要素における残差を粗い要素における残差に写像し、連立1次方程式の直接法または非定常的な反復解法を適用して粗い要素に対する修正ベクトルを作成し、作成手段によって作成された行列を用いて粗い要素に対する修正ベクトルを細かな要素における修正ベクトルを求ることによって、細かな要素の近似解の精度を上げる。
- [0019] 本発明の別の局面に従えば、解析対象の電磁界を解析する電磁界解析方法をコンピュータに実行させるためのコンピュータ・プログラムであって、コンピュータは、分割した要素を記憶する第1の記憶手段と、行列を記憶する第2の記憶手段とを含み、電磁界解析方法は、解析対象の形状データを粗い要素と細かな要素とに分割して第1の記憶手段に記憶するステップと、第1の記憶手段に記憶された粗い要素の電磁界ベクトルと細かな要素の電磁界ベクトルとを関連付ける行列を作成して第2の記憶部に記憶するステップと、第2の記憶手段に記憶された行列を参照しながら、連立1次方程式の反復解法を適用して細かな要素の電磁界ベクトルの近似解を演算するステップとを含む。
- [0020] 本発明のさらに別の局面に従えば、解析対象の電磁界を解析する電磁界解析方法をコンピュータに実行させるためのプログラムを記録したコンピュータで読み取り可能な記録媒体であって、コンピュータは、分割した要素を記憶する第1の記憶手段と、行列を記憶する第2の記憶手段とを含み、電磁界解析方法は、解析対象の形状データを粗い要素と細かな要素とに分割して第1の記憶手段に記憶するステップと、第

1の記憶手段に記憶された粗い要素の電磁界ベクトルと細かな要素の電磁界ベクトルとを関連付ける行列を作成して第2の記憶部に記憶するステップと、第2の記憶手段に記憶された行列を参照しながら、連立1次方程式の反復解法を適用して細かな要素の電磁界ベクトルの近似解を演算するステップとを含む。

### 発明の効果

- [0021] 本発明のある局面によれば、作成手段が、分割手段によって分割された粗い要素の電磁界ベクトルと細かな要素の電磁界ベクトルとを関連付ける行列を作成するので、Non-nested Meshを使用したMultigrid法を用いて電磁界解析を行なうことが可能となった。また、演算手段が、作成手段によって作成された行列を参照しながら細かな要素の電磁界ベクトルの近似解を演算するので、細かな要素の電磁界ベクトルを直接法を用いて計算する必要がなくなり、電磁界解析に要する時間を大幅に短縮することが可能となった。
- [0022] また、作成手段が、細かな要素の辺における電磁界ベクトルの要素を、粗い要素における補間関数を用いて表すことによって行列を作成するので、行列を容易に作成することが可能となった。
- [0023] また、作成手段は、後述する式(14)によって行列  $P_{ij}$  を作成するので、行列をさらに容易に作成することが可能となった。
- [0024] また、演算手段が、作成手段によって作成された行列を用いて細かな要素の電磁界ベクトルの近似解を修正するようにしたので、細かな要素の近似解の精度を上げる処理を高速に行なうことが可能となった。

### 図面の簡単な説明

- [0025] [図1]本発明の実施の形態における電磁界解析装置の外観例を示す図である。
- [図2]本発明の実施の形態における電磁界解析装置の構成例を示すブロック図である。
- [図3]本発明の実施の形態における電磁界解析装置の機能的構成を示すブロック図である。
- [図4]本発明の実施の形態における電磁界解析装置の処理手順を説明するためのフローチャートである。

[図5A]マイクロストリップラインを大きい要素に分割したところを示す図である。

[図5B]図5Aに示す大きい要素で解析を行ない、誤差を評価して細分化したところを示す図である。

[図6]四面体における電磁界 $u$ の辺に接する成分を示す図である。

[図7] $\Omega^F$ における電磁界ベクトル $u^F$ と $\Omega^C$ における電磁界ベクトル $u^C$ との関係を示す図である。

[図8]本発明の実施の形態における電磁界解析装置の解析対象である方形導波管の一例を示す図である。

[図9]図8に示す方形導波管を2.45GHzのTE10モードで駆動したときの要素数に対する計算時間を、従来の直接法を用いた場合と本発明を用いた場合とで比較するための図である。

[図10]本発明の実施の形態における電磁界解析装置の解析対象であるパッチアンテナの一例を示す図である。

[図11]図10に示すパッチアンテナを7.0GHzで駆動したときの要素数に対する計算時間を、従来の直接法を用いた場合と本発明を用いた場合とで比較するための図である。

[図12A]2次元解析の場合のNested Meshによる要素の分割を示す図である。

[図12B]3次元解析の場合のNested Meshによる要素の分割を示す図である。

[図13A]円をNested Meshによって要素分割して、粗い要素を作成したところを示す図である。

[図13B]粗い要素をNested Meshによって細かな要素に分割したところを示す図である。

[図13C]円をNon-Nested Meshによって要素分割して、細かな要素を作成したところを示す図である。

[図14A]正方形をNested Meshによって要素分割して、粗い要素を作成したところを示す図である。

[図14B]粗い要素をNested Meshによって細かな要素に分割したところを示す図である。

[図14C]正方形をNon-Nested Meshによって要素分割して、細かな要素を作成したところを示す図である。

### 符号の説明

[0026] 1 コンピュータ本体、2 ディスプレイ装置、3 FDドライブ、4 FD、5 キーボード、6 マウス、7 CD-ROM装置、8 CD-ROM、9 ネットワーク通信装置、10 CPU、11 ROM、12 RAM、13 ハードディスク、21 形状データ記憶部、22 要素分割部、23 要素記憶部、24 ベクトル・行列作成部、25 Prolongation行列作成部、26 ベクトル・行列記憶部、27 Prolongation行列記憶部、28 近似値演算部、29 近似解修正部、30 電磁界ベクトル記憶部。

### 発明を実施するための最良の形態

[0027] 図1は、本発明の実施の形態における電磁界解析装置の外観例を示す図である。この電磁界解析装置は、コンピュータ本体1、ディスプレイ装置2、FD(Flexible Disk)4が装着されるFDドライブ3、キーボード5、マウス6、CD-ROM(Compact Disc-Read Only Memory)8が装着されるCD-ROM装置7、およびネットワーク通信装置9を含む。電磁界解析プログラムは、FD4またはCD-ROM8等の記録媒体によって供給される。電磁界解析プログラムがコンピュータ本体1によって実行されることによって、電磁界解析が行なわれる。また、電磁界解析プログラムは他のコンピュータよりネットワーク通信装置9を経由し、コンピュータ本体1に供給されてもよい。

[0028] 図2は、本発明の実施の形態における電磁界解析装置の構成例を示すブロック図である。図1に示すコンピュータ本体1は、CPU(Central Processing Unit)10、ROM(Read Only Memory)11、RAM(Random Access Memory)12およびハードディスク13を含む。CPU10は、ディスプレイ装置2、FDドライブ3、キーボード5、マウス6、CD-ROM装置7、ネットワーク通信装置9、ROM11、RAM12またはハードディスク13との間でデータを入出力しながら処理を行う。FD4またはCD-ROM8に記録された電磁界解析プログラムは、CPU10によりFDドライブ3またはCD-ROM装置7を介してハードディスク13に格納される。CPU10は、ハードディスク13から適宜電磁界解析プログラムをRAM12にロードして実行することによって、電磁界解析が行なわれる。

[0029] 図3は、本発明の実施の形態における電磁界解析装置の機能的構成を示すブロック図である。電磁界解析装置は、解析対象の形状データを記憶する形状データ記憶部21と、形状データを要素の大きさを変えて分割する要素分割部22と、要素分割部22によって分割された要素を記憶する要素記憶部23と、連立1次方程式におけるベクトルおよび行列を作成するベクトル・行列作成部24と、Prolongation行列を作成するProlongation行列作成部25と、ベクトル・行列作成部24によって作成されたベクトルおよび行列を記憶するベクトル・行列記憶部26と、Prolongation行列作成部25によって作成されたProlongation行列を記憶するProlongation行列記憶部27と、電磁界ベクトルの近似値を演算する近似値演算部28と、近似値演算部28によって演算された近似解を修正する近似解修正部29と、近似解修正部29によって修正された後の近似解を電磁界ベクトルとして記憶する電磁界ベクトル記憶部30とを含む。

[0030] なお、形状データ記憶部21、要素記憶部23、ベクトル・行列記憶部26、Prolongation行列記憶部27および電磁界ベクトル記憶部30は、図2のRAM12またはハードディスク13内の所定領域に設けられる。また、要素分割部22、ベクトル・行列作成部24、Prolongation行列作成部25、近似値演算部28および近似解修正部29のそれぞれの機能は、図2に示すCPU10がRAM12にロードされた電磁界解析プログラムを実行することによって実現される。

[0031] 図4は、本発明の実施の形態における電磁界解析装置の処理手順を説明するためのフローチャートである。まず、要素分割部22は、形状データ記憶部21に記憶される解析対象の形状データを読み取り、形状データを要素に分割し、分割した後の要素を要素記憶部23に保存する(S11)。要素分割部22は、2次元解析の場合には形状データを三角形または四角形の要素に分割し、3次元解析の場合には形状データを四面体、三角柱または四角柱に分割する。

[0032] 要素分割部22は、形状データを要素の大きさを変えて分割する。ここでは説明を簡単にするために、2種類の大きさの要素を作成するものとし、大きい方の(粗い)要素の集合を  $\Omega^C$  とし、小さい方の(細かな)要素の集合を  $\Omega^F$  とする。なお、添え字Cは Coarse を表し、FはFineを表している。

[0033]  $\Omega^C$  と  $\Omega^F$  を独立に作成してもよいが、まず  $\Omega^C$  を作成し、それを細分化して  $\Omega^F$  を作

成した方が処理時間を短縮できる。細分化の方法には、体積の大きな要素を再分割する方法と、 $\Omega^C$ を用いて解析を行ない、誤差の大きい要素を再分割する方法がある。いずれを使用してもよいが、誤差を評価する方法の方が計算精度は良い。なお、誤差を評価する方法は、文献1(神谷紀生他、“コンピュートロール、特集／ソフトウェアの誤差評価とアダプティブ要素,”No.42, コロナ社, 1993)を参照されたい。

[0034] 図5A～5Bは、マイクロストリップラインにおける要素分割の一例を示す図である。図5Aは、マイクロストリップラインを大きい要素に分割したところを示している。また、図5Bは、図5Aに示す大きい要素で解析を行ない、誤差を評価して細分化したところを示している。電極の端に電磁界が集中するため、その部分が細かく再分割されている。

[0035] 次に、ベクトル・行列作成部24は、要素記憶部23に記憶される要素 $\Omega^C$ と $\Omega^F$ とを読み込み、Maxwell方程式に有限要素法を適用してそれらを要素で離散化し、連立1次方程式における行列および列ベクトルを作成する(S12)。ここで、対象にしている Maxwell方程式は次式によって表される。

[0036] [数1]

$$\nabla \times H = (\hat{\sigma} + j\omega \hat{\epsilon}) E \quad \cdots (1)$$

$$\nabla \times E = -j\omega \hat{\mu} H \quad \cdots (2)$$

ここで、 $E$ ：電界、 $H$ ：磁界、 $\hat{\epsilon}$ ：誘電率、 $\hat{\mu}$ ：透磁率、 $\hat{\sigma}$ ：導電率、 $\omega$ ：角周波数、 $\nabla$ は微分演算子 $(\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z)$ 、 $\times$ は外積、 $j$ は虚数を意味する。

[0037] これらの式から、次の微分方程式が得られる。

[0038] [数2]

$$\nabla \times \hat{p} \nabla \times u - \omega^2 \hat{q} u = 0 \quad \cdots (3)$$

$u$ は電界、磁界、ベクトルポテンシャルなどを表わし、 $\hat{p}$ と $\hat{q}$ は誘電率や透磁率の物性値を表わす。たとえば、式(2)を式(1)に代入して $H$ を削除して式(3)を作成した場合は、 $u$ は電界、 $\hat{p}$ は透磁率の逆数、 $\hat{q}$ は誘電率になる。

[0039] 以上の前工程で作成した要素 $V_k$ に対して有限要素法を適用すると次式が得られる。

[0040] [数3]

$$\int_{V_k} (\nabla \times N_{ki}) \hat{p} (\nabla \times u) dV - \omega^2 \int_{V_k} N_{ki} \hat{q} u dV = \int_{\partial V_k} (N_{ki} \times \hat{p} \nabla \times u) \cdot n dS$$

…(4)

[0041] ここで、 $\partial V_k$  は  $V_k$  の表面であり、 $n$  はその外向き単位法線ベクトルである。 $N_{ki}$  は補間関数(形状関数、内挿関数、基底関数などとも呼ばれる。)である。四面体要素で1次式を使用した場合、補間関数は次式によって与えられる。

[0042] [数4]

$$\begin{aligned} N_{k1} &= |l_1| (L_2 \nabla L_3 - L_3 \nabla L_2) \\ N_{k2} &= |l_2| (L_3 \nabla L_1 - L_1 \nabla L_3) \\ N_{k3} &= |l_3| (L_1 \nabla L_2 - L_2 \nabla L_1) \\ N_{k4} &= |l_4| (L_1 \nabla L_4 - L_4 \nabla L_1) \\ N_{k5} &= |l_5| (L_2 \nabla L_4 - L_4 \nabla L_2) \\ N_{k6} &= |l_6| (L_3 \nabla L_4 - L_4 \nabla L_3) \end{aligned} \quad \dots (5)$$

[0043] ここで、 $L_1 \sim L_4$  は体積座標系、 $|l_1| \sim |l_6|$  は辺  $l_i$  の長さである。なお、体積座標系の詳細については、文献2(T.Itoh, G.Pelosi and P.P.silvester, "Finite Element Software for Microwave Engineering," John Wiley & Sons, pp101-125, 1996)を参照されたい。

[0044] 図6は、四面体における電磁界  $u$  の辺に接する成分を示す図である。電磁界  $u$  の成分は6つの辺に配置され、それぞれ  $u_1 \sim u_6$  で表される。要素  $V_k$  の内部の点  $x$  における電磁界は、式(5)と6つの電磁界成分とを使って次式で表すことができる。

[0045] [数5]

$$u(x) = \sum_{i=1}^6 N_{ki}(x) u_{ki} \quad \dots (6)$$

[0046] 式(6)を式(4)に代入し、 $\Omega^F$  の全ての要素に適用すると次の連立1次方程式が得られる。

[0047] [数6]

$$A^F u^F = b^F \quad \cdots (7)$$

[0048] ここで、 $u^F$ は辺に配置した電磁界を並べたベクトルであり、その次元はおよそ辺の数に等しい。行列 $A^F$ の成分は、次式によって作成する。

[0049] [数7]

$$\sum_{k=1}^{N^F} \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^6 \left[ \int_{V_k} (\nabla \times N_{ki}) \hat{p} (\nabla \times N_{kj}) dV - \omega^2 \int_{V_k} N_{ki} \hat{q} N_{kj} dV \right] \quad \cdots (8)$$

[0050] また、ベクトル $b^F$ は、次式によって作成する。

[0051] [数8]

$$\sum_{k=1}^{N^F} \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^6 \int_{\partial V_k} (N_{ki} \times \hat{p} \nabla \times N_{kj}) \cdot n dS \quad \cdots (9)$$

[0052] ここで、 $N^F$ は $\Omega^F$ にある要素の数である。

[0053] ベクトル・行列作成部24は、同様の手順で $\Omega^C$ に対する行列 $A^C$ も作成し、 $A^F$ ,  $b^F$ および $A^C$ をベクトル・行列記憶部26に保存する。式(7)の連立1次方程式を計算して $u^F$ を求めれば、式(6)により電磁界分布を計算でき、式(1)、(2)のMaxwell方程式が解けたことになる。

[0054] 次に、Prolongation行列作成部25は、前工程で作成した要素 $\Omega^F$ と $\Omega^C$ とを要素記憶部23から読み込み、その幾何学情報を元に、 $\Omega^F$ における電磁界ベクトル $u^F$ と、 $\Omega^C$ における電磁界ベクトル $u^C$ とを関連付けるProlongation行列 $P$ を作成する(S13)。このProlongation行列によって、次式に示すように一方のベクトルから他方のベクトルを求めることができる。

[0055] [数9]

$$u^F = P u^C \quad \cdots (10)$$

$$u^C = P^t u^F \quad \cdots (11)$$

[0056] ここで、 $t$ は転置行列を意味する。

[0057] 図7は、 $\Omega^F$ における電磁界ベクトル $u^F$ と $\Omega^C$ における電磁界ベクトル $u^C$ との関係を

示す図である。列ベクトル  $u^C$  の  $j$  成分  $u_j^C$  は、 $\Omega^C$  の要素の辺に配置されており、 $\Omega^F$  における位置  $x$  での電磁界  $u(x)$  は、 $\Omega^C$  における補間関数  $N^C$  を用いて次式で表すことができる。

[0058] [数10]

$$u(x) = \sum_j N_j^C(x) u_j^C \quad \cdots (12)$$

[0059]  $u^F$  の  $i$  成分  $u_i^F$  は、それが配置された辺  $l_i$  における電磁界の平均値とする。すなわち、 $u^F$  の  $i$  成分  $u_i^F$  は次式によって表される。

[0060] [数11]

$$u_i^F = \frac{1}{|l_i|} \int_{l_i} u(x) \cdot t_i dl \quad \cdots (13)$$

[0061] ここで、 $t_i$  は辺  $l_i$  の単位接線ベクトルである。式(12)を式(13)に代入し、式(10)と比較すると、Prolongation行列  $P$  の  $ij$  成分  $P_{ij}$  は次式で与えられる。

[0062] [数12]

$$P_{ij} = \frac{1}{|l_i|} \int_{l_i} N_j^C(x) \cdot t_i dl \quad \cdots (14)$$

[0063] Prolongation行列作成部25は、式(14)を用いてProlongation行列を作成してProlongation行列記憶部27に保存する。

[0064] 次に、近似値演算部28は、マルチグリッド法による連立1次方程式を用いて電磁界ベクトル  $u^F$  を計算するために、 $u^F$  に対する適当な初期値  $v^F$  を設定する(S14)。この初期値  $v^F$  は、0 であってもよい。なお、マルチグリッド法による連立1次方程式の計算の詳細は、文献3(W.Briggs, V.Henson and S.McCormick, "A Multigrid Tutorial," SIAM)を参照されたい。

[0065] 次に、近似値演算部28は、式(7)にJacobi法、Gauss-Seidel法またはSOR法などの連立1次方程式の定常的な反復解法を適用して、 $v^F$  に含まれる誤差の高周波成分を除去する(S15)。なお、この反復解法の詳細については、文献4(長谷川里美、

長谷川秀彦、藤野清次訳、“反復法Templates,”朝倉書店, 1996)を参照されたい。

[0066] 次に、近似値演算部28は、低周波成分を除去するために、次式を用いて  $\Omega^F$  における残差  $r^F$  を  $\Omega^C$  の残差  $r^C$  に写像する(S16)。

[0067] [数13]

$$r^F = b^F - A^F v^F \quad \cdots (15)$$

$$r^C = P^t r^F \quad \cdots (16)$$

[0068] 次に、近似値演算部28は、次式(17)の連立1次方程式を解き、修正ベクトル  $e^C$  を計算する(S17)。

[0069] [数14]

$$A^C e^C = r^C \quad \cdots (17)$$

[0070] この式(17)は、Gaussの消去法による直接法、CG法、GMRES法など非定常的な反復解法が使用されるが、式(7)に比べて小さな行列なので短時間で計算することができる。なお、この反復解法の詳細については、上記文献4を参照されたい。

[0071] 次に、近似解修正部29は、次式(18)、(19)を用いて  $\Omega^C$  の修正ベクトルを  $\Omega^F$  の修正ベクトルに戻し、近似解の精度を上げる(S18)。

[0072] [数15]

$$e^F = P e^C \quad \cdots (18)$$

$$v^F = v^F + e^F \quad \cdots (19)$$

[0073] 近似解修正部29は、再度ステップS15に示すスムージング (Smoothing) を数回適用して高周波成分を減衰させる(S19)。

[0074] 以上のステップS15～S19の処理がマルチグリッド法の基本的なアルゴリズムであるが、収束が遅い場合があるので、必要に応じて連立1次方程式の別の反復解法を併用して収束を早める(S20)。具体的には、以上の処理をCG法、GMRES法、GCR法などの非定常解法の前処理として使用するか、または残差切除法などにより加速する。なお、残差切除法の詳細については、文献5(菊池他、日本機械学会論文

集、62-604、B編、pp4076-、1996-12)を参照されたい。

[0075] 次に、近似解修正部29は、式(15)の残差を評価する(S21)。残差が大きな値であれば(S21, No)、電磁界ベクトルが収束していないとして、ステップS15に戻って以降の処理を繰返す。また、残差が十分小さな値であれば(S21, Yes)、電磁界ベクトルが収束しているとして、近似解  $u^F$  を電磁界ベクトル記憶部30に保存して(S22)、処理を終了する。

[0076] 図8は、本発明の実施の形態における電磁界解析装置の解析対象である方形導波管の一例を示す図である。この方形導波管の寸法は図8に示す通りであり、内部は空気によって満たされている。この方形導波管の電磁界解析は、四面体1次要素を使用して行なわれる。

[0077] 図9は、図8に示す方形導波管を2.45GHzのTE10モードで駆動したときの要素数に対する計算時間を、従来の直接法を用いた場合と本発明を用いた場合とで比較するための図である。図9から分かるように、要素数が多くなるにしたがって、本実施の形態における電磁界解析装置を用いた場合の効果が顕著となり、要素数が206, 266の場合には従来の直接法に比べて約17倍の速度となっている。

[0078] 図10は、本発明の実施の形態における電磁界解析装置の解析対象であるパッチアンテナの一例を示す図である。このパッチアンテナの寸法は図10に示す通りであり、厚み0.794mmで比誘電率2.2の誘電体基板上に形成されている。このパッチアンテナの電磁界解析は、四面体1次要素を使用して行なわれる。

[0079] 図11は、図10に示すパッチアンテナを7.0GHzで駆動したときの要素数に対する計算時間を、従来の直接法を用いた場合と本発明を用いた場合とで比較するための図である。図11から分かるように、要素数が多くなるにしたがって、本実施の形態における電磁界解析装置を用いた場合の効果が顕著となり、要素数が88, 445の場合には従来の直接法に比べて約15倍の速度となっている。

[0080] 以上説明したように、本実施の形態における電磁界解析装置によれば、 $\Omega^F$ における電磁界ベクトル  $u^F$  と、 $\Omega^C$ における電磁界ベクトル  $u^C$  とを関連付けるProlongation行列  $P$ を作成し、このProlongation行列を用いて電磁界ベクトルを計算するようにしたので、Non-nested Meshを使用したMultigrid法を用いて電磁界解析を行なうことが可

能となった。

- [0081] また、Non-Nested Meshを使用したMultigrid法を用いて電磁界解析ができるようになったことにより、直接法を用いた電磁界解析と比較して、解析に要する時間を大幅に短縮することが可能となった。
- [0082] 今回開示された実施の形態は、すべての点で例示であって制限的なものではないと考えられるべきである。本発明の範囲は上記した説明ではなくて請求の範囲によつて示され、請求の範囲と均等の意味および範囲内でのすべての変更が含まれることが意図される。

## 請求の範囲

[1] 解析対象の形状データを粗い要素と細かな要素とに分割するための分割手段(22)と、

前記分割手段(22)によって分割された粗い要素の電磁界ベクトルと細かな要素の電磁界ベクトルとを関連付ける行列を作成するための作成手段(25)と、

前記作成手段(25)によって作成された行列を参照しながら、連立1次方程式の反復解法を適用して前記細かな要素の電磁界ベクトルの近似解を演算するための演算手段(28, 29)とを含む電磁界解析装置。

[2] 前記作成手段(25)は、前記細かな要素の辺における電磁界ベクトルの要素を、前記粗い要素における補間関数を用いて表すことによって前記行列を作成する、請求項1記載の電磁界解析装置。

[3] 前記細かな要素の辺<sub>i</sub>の長さを  $|l_i|$ 、前記細かな要素の辺<sub>i</sub>の位置<sub>i</sub>における電磁界と前記粗い要素の辺<sub>j</sub>における電磁界との関係を示す補間関数を  $N_j^C(x)$ 、前記細かな要素の辺<sub>i</sub>の接線ベクトルを  $t_i$  とすると、前記作成手段(25)は次式によって前記行列  $P_{ij}$  を作成する、請求項2記載の電磁界解析装置。

[数1]

$$P_{ij} = \frac{1}{|l_i|} \int_{l_i} N_j^C(x) \cdot t_i dl \quad \cdots (14)$$

[4] 前記演算手段(28, 29)は、連立1次方程式の定常的な反復解法を適用して前記細かな要素の電磁界ベクトルの近似解に含まれる高周波成分を除去し、前記作成手段(25)によって作成された行列を用いて前記細かな要素における残差を前記粗い要素における残差に写像し、連立1次方程式の直接法または非定常的な反復解法を適用して前記粗い要素に対する修正ベクトルを作成し、前記作成手段(25)によって作成された行列を用いて前記粗い要素に対する修正ベクトルを前記細かな要素における修正ベクトルを求ることによって、前記細かな要素の近似解の精度を上げる、請求項1～3のいずれかに記載の電磁界解析装置。

[5] 解析対象の電磁界を解析する電磁界解析方法をコンピュータに実行させるための

コンピュータ・プログラムであって、

前記コンピュータは、分割した要素を記憶する第1の記憶手段(23)と、行列を記憶する第2の記憶手段(27)とを含み、

前記電磁界解析方法は、解析対象の形状データを粗い要素と細かな要素とに分割して前記第1の記憶手段(23)に記憶するステップと、

前記第1の記憶手段(23)に記憶された粗い要素の電磁界ベクトルと細かな要素の電磁界ベクトルとを関連付ける行列を作成して前記第2の記憶手段(27)に記憶するステップと、

前記第2の記憶手段(27)に記憶された行列を参照しながら、連立1次方程式の反復解法を適用して前記細かな要素の電磁界ベクトルの近似解を演算するステップとを含む、コンピュータ・プログラム。

[6] 解析対象の電磁界を解析する電磁界解析方法をコンピュータに実行させるためのプログラムを記録したコンピュータで読み取り可能な記録媒体であって、

前記コンピュータは、分割した要素を記憶する第1の記憶手段(23)と、行列を記憶する第2の記憶手段(27)とを含み、

前記電磁界解析方法は、解析対象の形状データを粗い要素と細かな要素とに分割して前記第1の記憶手段(23)に記憶するステップと、

前記第1の記憶手段(23)に記憶された粗い要素の電磁界ベクトルと細かな要素の電磁界ベクトルとを関連付ける行列を作成して前記第2の記憶手段(27)に記憶するステップと、

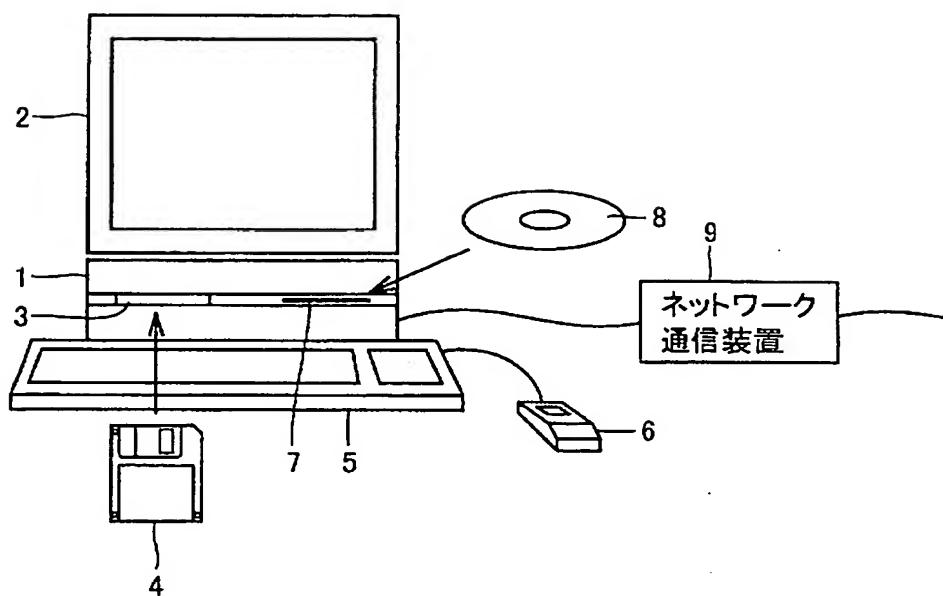
前記第2の記憶手段(27)に記憶された行列を参照しながら、連立1次方程式の反復解法を適用して前記細かな要素の電磁界ベクトルの近似解を演算するステップとを含む、コンピュータで読み取り可能な記録媒体。

## 要 約 書

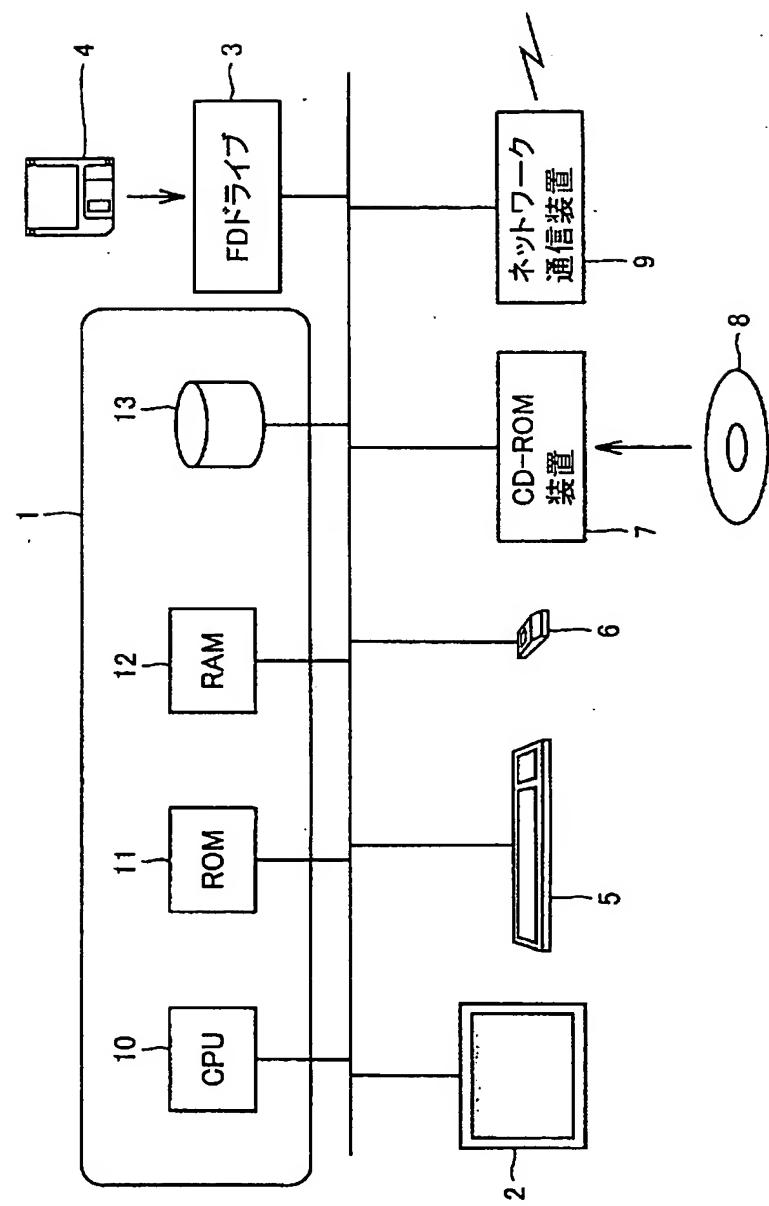
要素分割部(22)は、解析対象の形状データを粗い要素と細かな要素とに分割する。

Prolongation行列作成部(25)は、要素分割部(22)によって分割された粗い要素の電磁界ベクトルと細かな要素の電磁界ベクトルとを関連付けるProlongation行列を作成する。そして、近似値演算部(28)および近似解修正部(29)は、Prolongation行列を参照しながら、連立1次方程式の反復解法を適用して細かな要素の電磁界ベクトルの近似解を演算する。したがって、Non-nested Meshを使用したMultigrid法を用いて電磁界解析を高速に行なうことが可能となる

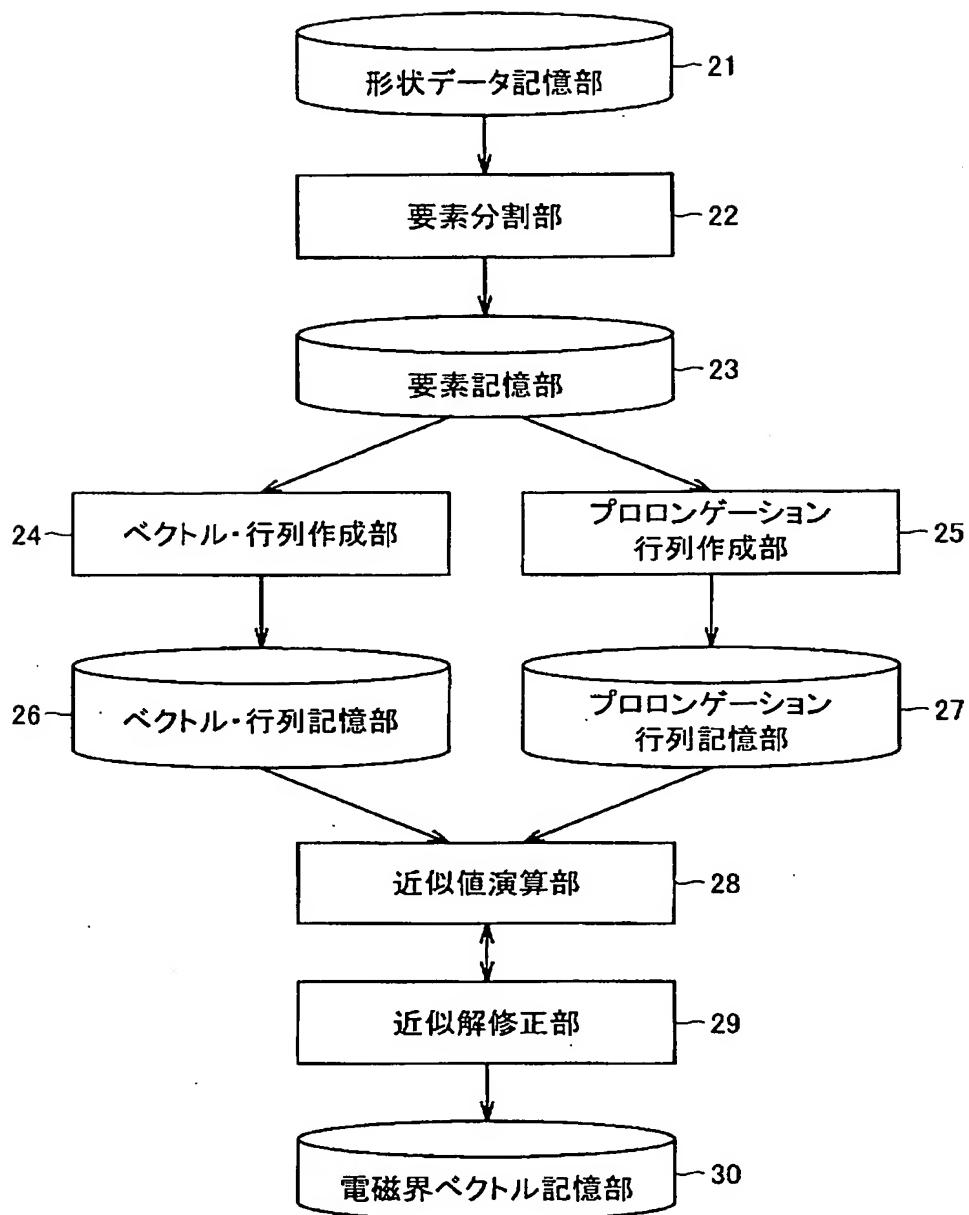
[図1]



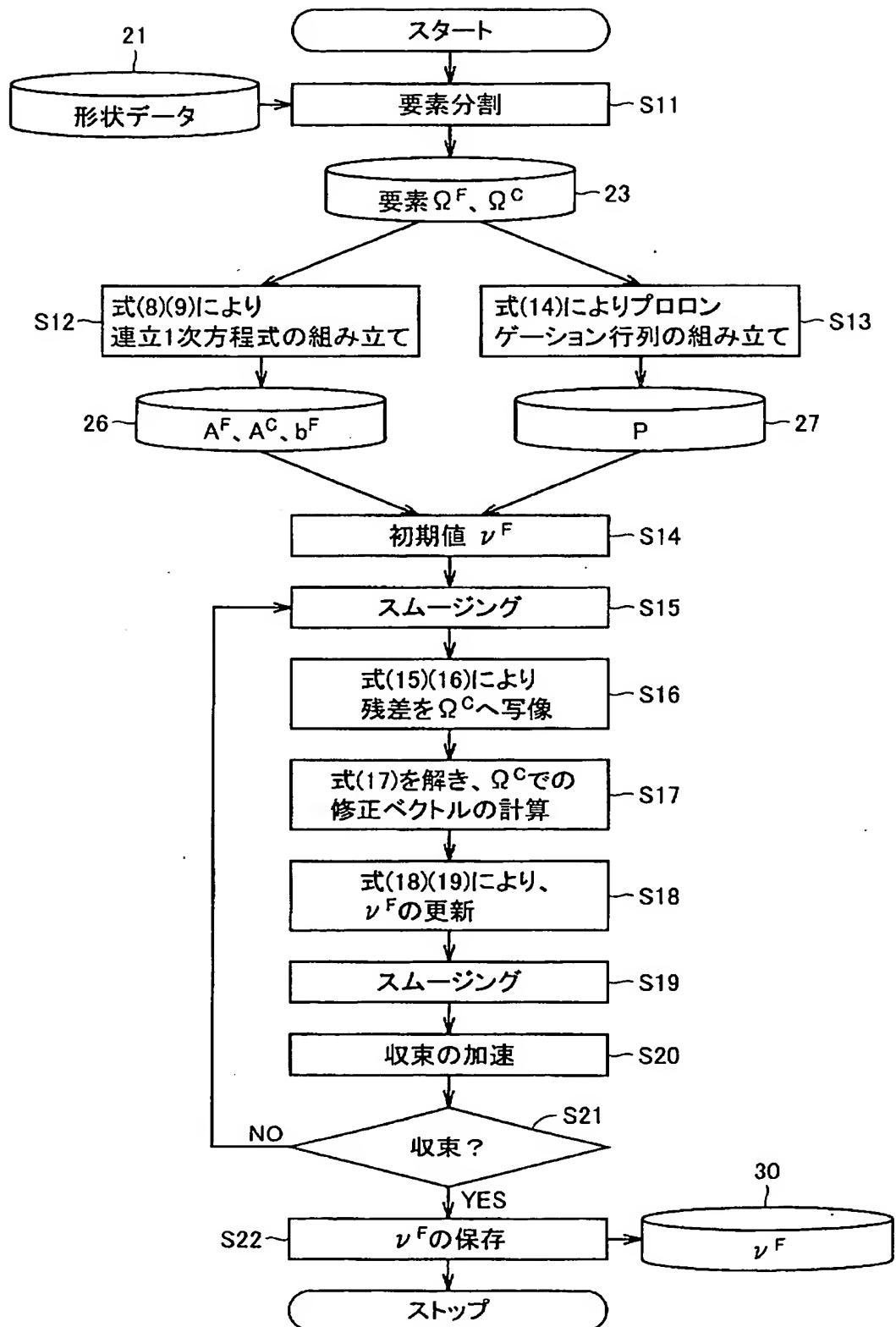
[図2]



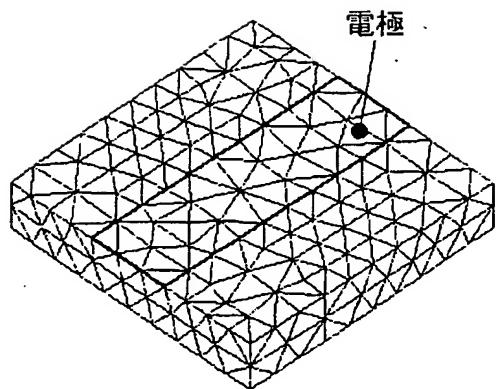
[図3]



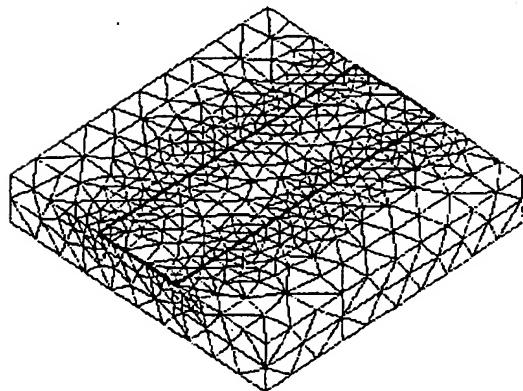
[図4]



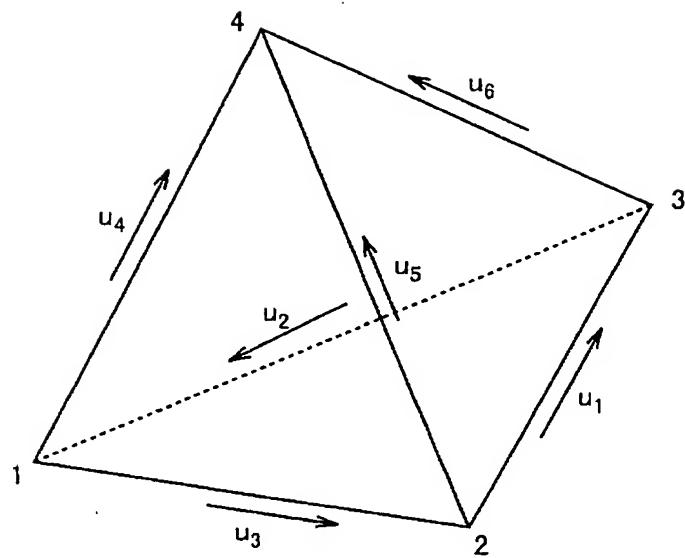
[図5A]



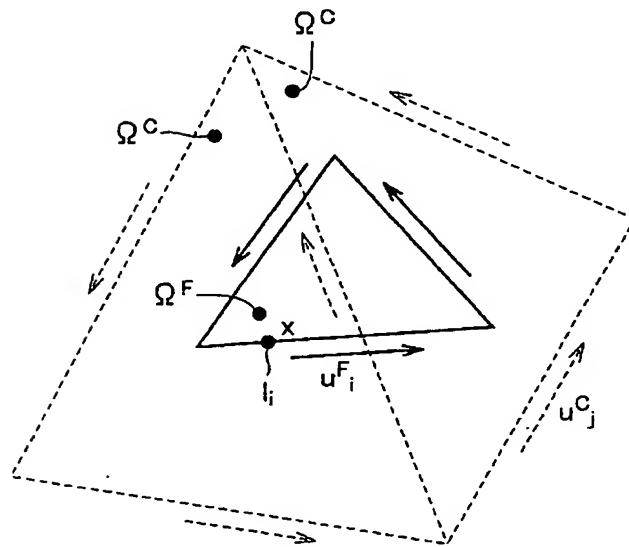
[図5B]



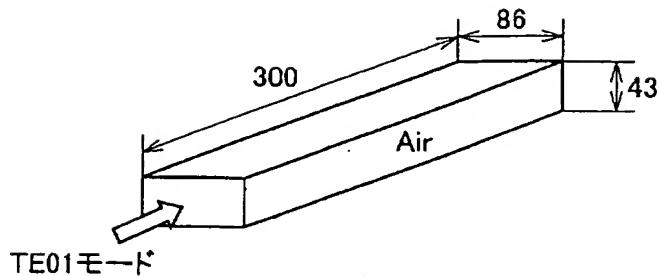
[図6]



[図7]



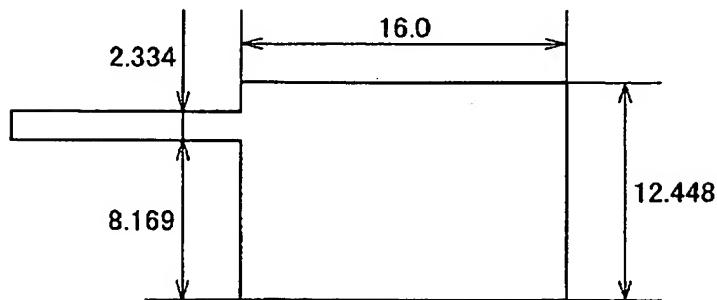
[図8]



[図9]

No	要素数	直接法の時間	本発明の時間	比率
1	18,790	56秒	25秒	2.2
2	41,357	225秒	76秒	3.0
3	92,813	1,532秒	167秒	9.2
4	206,266	9,356秒	562秒	16.7

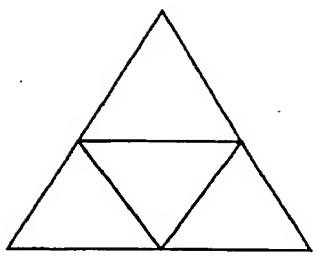
[図10]



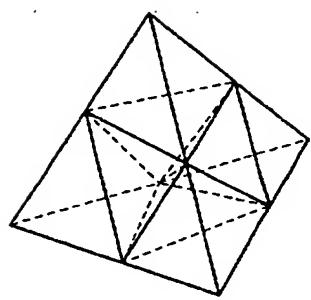
[図11]

No	要素数	直接法の時間	本発明の時間	比率
1	19,595	641秒	170秒	3.8
2	41,369	2,223秒	255秒	8.7
3	88,445	8,161秒	541秒	15.0

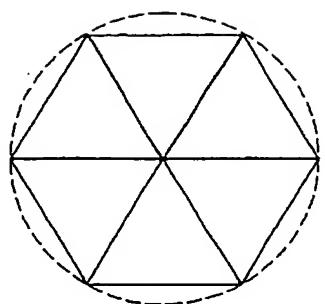
[図12A]



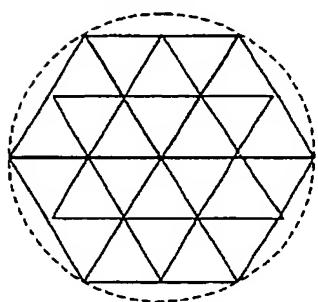
[図12B]



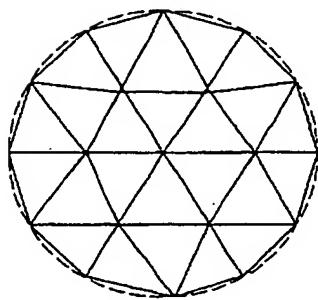
[図13A]



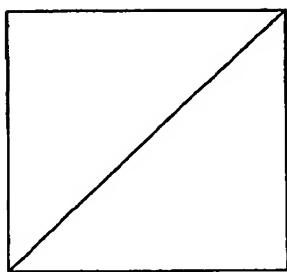
[図13B]



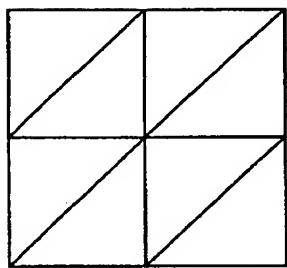
[図13C]



[図14A]



[図14B]



[図14C]

